Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Mecânica

# Aulas de Laboratório
# SEM 0536 - Sistemas de Controle I

São Carlos
2008

# Sumário

**1 Controle de Velocidade** **1**

1.1 Objetivos . . . . . 1

1.2 Requisitos do sistema . . . . . 1

1.3 Modelo Matemático . . . . . 2

1.4 Pré-laboratório . . . . . 3

1.4.1 Especificações do controlador . . . . . 3

1.4.2 Características do sistema em malha aberta . . . . . 4

1.4.3 Parâmetros de controle . . . . . 4

1.5 Procedimento de Laboratório . . . . . 5

1.5.1 Ligações e conexões . . . . . 5

1.5.2 Implementação do controlador . . . . . 5

1.6 Relatório . . . . . 5

1.6.1 Questões de pós-laboratório . . . . . 7

1.7 Apêndice - A: Nomenclatura SRV02 . . . . . 8

1.8 Apêndice - B: Nomenclatura do sistema . . . . . 9

# Capítulo 1

# Controle de Velocidade

## 1.1 Objetivos

O objetivo neste experimento é projetar um controlador que regule a velocidade de saida da haste.

No final desta sessão, você deverá saber:

- Como modelar matematicamente a planta servo.
- Adquirir o diagrama de Bode do sistema.
- Projetar e implementar o controlador para as especificações requeridas (usando projeto de margem de fase) e avaliar seu desempenho.

## 1.2 Requisitos do sistema

Para realizar este laboratório, o hardware abaixo é requerido:

[ 1 ] Módulo de potência *Quanser UPM 2405/1503* ou equivalente.

[ 1 ] *Quanser MultiQ/MQ3* ou equivalente.

[ 1 ] Planta servo *Quanser SRVO2-E*

[ 1 ] PC equipado com o requirido programa como declarado no manual do usuário.

## 1.3 Modelo Matemático

Começaremos examinando o esquema elétrico de um motor mostrado na Fig. 1.1.

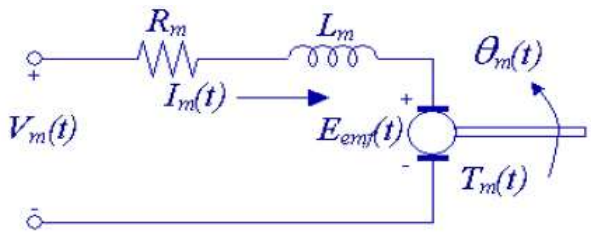


Figura 1.1: Circuito da armadura no domínio do tempo.

Usando a lei de Kirchhoff de tensão, obtém-se a equação abaixo:

$$V_m - R_m I_m - L_m \frac{dI_m}{dt} - E_{emf} = 0. \tag{1.1}$$

Desde que $L_m << R_m$, pode-se desconsiderar a indutância do motor, assim:

$$I_m = \frac{V_m - E_{emf}}{R_m}. \tag{1.2}$$

Sabe-se que $emf$ criada pelo motor é proporcional a velocidade do rotor $\omega_m$ tal que:

$$I_m = \frac{V_m - K_m \omega_m}{R_m}. \tag{1.3}$$

Mudando para o aspecto mecânico do motor e aplicando a segunda lei de Newton de movimento para o rotor do motor:

$$J_m \dot{\omega}_m = T_m - \frac{T_l}{\eta_g K_g}. \tag{1.4}$$

Sendo$\frac{T_l}{\eta_g K_g}$ a carga de torque visto direto das engrenagens. E $\eta_g$ a eficiência da caixa

de engrenagens. Aplicando a segunda lei de movimento na carga do motor:

$$J_l\dot{\omega}_l = T_l - B_{eq}\omega_l. \tag{1.5}$$

Sendo $B_{eq}$ o coeficiente viscoso de amortecimento.

Substituindo 1.4 em 1.5:

$$J_l\dot{\omega}_l = \eta_g K_g T_m - \eta_g K_g J_m \dot{\omega}_m - B_{eq}\omega_l. \tag{1.6}$$

Sabe-se que $\omega_m = K_g\omega_l$ e $T_m = \eta_m K_t I_m$ (sendo $\eta_m$ a eficiência do motor), 1.6 pode ser escrita como:

$$J_l\dot{\omega}_l + \eta g K_g^2 J_m\dot{\omega}_l + B_{eq}\omega_l = \eta_g\eta_m K_g K_t I_m. \tag{1.7}$$

Finalmente, pode-se combinar as equações elétricas e mecânicas substituindo 1.3 em 1.7, resultando na função de transferência desejada:

$$\frac{\omega_l(s)}{V_m(s)} = \frac{\eta_g\eta_m K_t K_g}{J_{eq}R_m s + (B_{eq}R_m + \eta_g\eta_m K_m K t K_g^2)}. \tag{1.8}$$

Sendo $J_{eq} = J_l + \eta_g J_m K_g^2$.

## 1.4 Pré-laboratório

### 1.4.1 Especificações do controlador

Este laboratório requer o projeto de um controlador para controlar a planta servo com as especificações que seguem:

1. O erro de estado do sistema deve ser zero (para uma entrada degrau).

2. A largura de banda deve estar em 100 rd/s (aproximadamente 16 Hz).

3. O sistema de malha aberta deve ter uma margem de fase de aproximadamente

75 graus.

4. O sistema não pode ter overshoot (o menor possível).

### 1.4.2 Características do sistema em malha aberta

Quando projeta-se um controlador de um sistema no domínio da frequência, é necessário estudar a resposta do sistema em malha aberta. Em casos onde o sistema não pode ser modelado (ou o sistema é muito complicado), um diagrama de Bode em malha aberta é obtido colocando uma entrada sinusoidal de frequência variável gravando a magnitude e fase da saída correspondente. Neste caso, o modelo é de primeira ordem e é suficientemente preciso. O diagrama de Bode em malha aberta usado no projeto será gerado pelo MATLAB usando o modelo da planta.

De modo a alcançar um erro fixo de estado para uma entrada degrau, nosso sistema deve ser do tipo 1. Pela definição, um sistema é do tipo 1 quando tem um pólo único localizado na origem. Por essa razão introduz-se um integrador na malha para que a entrada degrau fique sem erro de estado.

Tem-se uma função de transferência $G(s)$ com um integrador, resultando em uma função de transferência: $\frac{G(s)}{s}$.

### 1.4.3 Parâmetros de controle

Depois de alcançar o primeiro critério de erro de estado zero (com o integrador), a próxima tarefa deve ser definir a largura de banda do sistema.

1. Gerar um diagrama de Bode do sistema em malha aberta e determinar quanto ganho ($K_p$) deve ser introduzido para alcançar a largura de banda desejada.

   *Dica: A largura de banda será zero ao cruzar o zero do diagrama de Bode de malha aberta. Lembre-se de usar $\frac{G(s)}{s}$ quando gerar o diagrama de Bode.

   Depois de selecionar o ganho $K_p$ desejado, seu sistema de malha aberta será: $\frac{K_p G(s)}{s}$

   - Usando o novo sistema de malha aberta, gere outro diagrama de Bode para determinar a margem de fase.

- Calcule a quantidade de fase que o compensador vai requerer para que a especificação de projeto seja alcançada.

2. Uma vez que se tenha decidido sobre os parâmetros, projete um compensador que adicione a fase requerida para alcançar a margem de fase de 75 graus em uma frequência $\omega_m = 100rd/s$. Usando

$$\tau_p = tan\frac{\phi\pi}{180} \qquad \beta = \tau_p + \sqrt{\tau_p^2 + 1}, \tag{1.9}$$

o compensador é dado por:

$$C(s) = \beta\frac{s + \frac{\omega_m}{\beta}}{s + \beta\omega_m}, \tag{1.10}$$

sendo $\phi$ o acréscimo de fase.

Depois de determinar o controlador $C(s)$, gere um diagrama de Bode completo do sistema em malha aberta: $\frac{K_pC(s)G(s)}{s}$ para determinar se todas as especificações de projeto foram alcançadas.

## 1.5 Procedimento de Laboratório

### 1.5.1 Ligações e conexões

A primeira tarefa é assegurar que todo o sistema está ligado corretamente (Veja Apêndice - B). Se você está inseguro com a ligação, chame o professor. Com todos o sinais ligados corretamente você estará pronto para iniciar o laboratório.

### 1.5.2 Implementação do controlador

Utilizando o LabVIEW implemente o controlador e observe os efeitos físicos da planta.

## 1.6 Relatório

O relatório deve incluir:

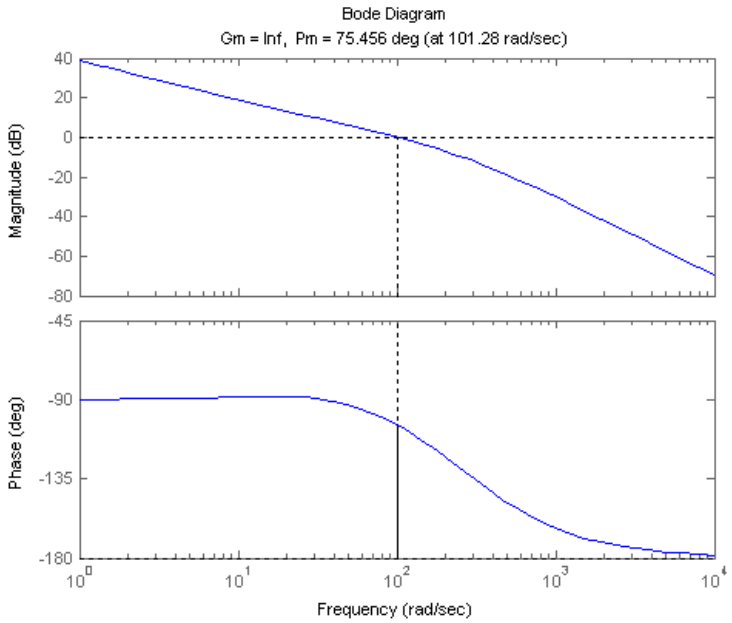


Figura 1.2: Diagrama de Bode em malha aberta do sistema completo incluindo o compensador. Como pode-se ver o sistema alcançou a margem de fase $\approx$ 75 graus como também um largura de banda de $\approx$ 100 rad/s.

1. Características do sistema - diagrama de Bode. Aqui deve-se incluir todos os diagramas de Bodes gerados com todas figuras legendadas.

2. Procedimento de projeto. Claramente indique todos os passos de projeto feitos na obtenção do controlador final. Nesta seção, faça referências claras aos diagramas de Bode utilizados e legende a margem de fase de cada figura.

3. Qualquer repetição no projeto do controlador deve ser documentada. (Se o projeto original não alcançar as especificações requeridas ou se quiser melhores respostas).

4. Um diagrama de Bode do sistema completo em malha aberta.

5. Uma resposta degrau do sistema incluindo as velocidades reais, e a entrada de comando.

6. Observações e conclusões finais como também as respostas das questões de pós-laboratório.

### 1.6.1 Questões de pós-laboratório

1. Durante o laboratório, houve algum problema ou limitação? Se sim, quais foram e como foram solucionados?

2. A resposta real do sistema é igual à esperada? Explique.

## 1.7 Apêndice - A: Nomenclatura SRV02

Tabela 1.1: Parâmetros do Sistema

| **Símbolo** | **Descrição** | **Valor nominal(SI)** |
|---|---|---|
| $V_m$ | Tensão de entrada do circuito de armadura | |
| $I_m$ | Corrente de entrada do circuito de armadura | |
| $R_m$ | Resistência de armadura | 2.6 |
| $L_m$ | Indutância de armadura | |
| $E_{emf}$ | Força eletromotriz do motor | |
| $\theta_m$ | Posição da haste do motor | |
| $w_m$ | Velocidade angular da haste do motor | |
| $\theta_l$ | Posição da haste da carga | |
| $w_l$ | Velocidade angular da haste da carga | |
| $T_m$ | Torque gerado pelo motor | |
| $T_l$ | Torque aplicado na carga | |
| $K_m$ | Constante da Força contra-eletromotriz | 0.00767 |
| $K_t$ | Constante de torque do motor | 0.00767 |
| $J_m$ | Momento de inércia do motor | 3.87e-7 |
| $J_{eq}$ | Momento de inércia equivalente da carga | 2.0e-3 |
| $B_{eq}$ | Coeficiente viscoso de amortecimento equivalente | 4.0e-3 |
| $K_g$ | Redução SRV02 | 70(14x5) |
| $\eta_g$ | Eficiência da redução | 0.9 |
| $\eta_m$ | Eficiência do motor | 0.69 |
| $w_n$ | Frequência natural de não-amortecimento | |
| $\zeta$ | Razão de amortecimento | |
| $K_p$ | Ganho proporcional | |
| $K_v$ | Ganho de velocidade | |
| $T_p$ | Tempo de pico | |

## 1.8 Apêndice - B: Nomenclatura do sistema

Tabela 1.2: Nomes dos componentes

| | | | |
|---|---|---|---|
| **1** | Lâmina superior | **16** | Conector S2 |
| **2** | Lâmina inferior | **17** | Conector do Encoder |
| **3** | Pilar | **18** | Conector do Tacômetro |
| **4** | Engrenagem do motor - 72 dentes | **19** | Conector do motor |
| **5** | Engrenagem de saída | **20** | Engrenagem do motor - 24 dentes |
| **6** | Engrenagem potenciômetro | **21** | Engrenagem da carga - 120 dentes |
| **7** | Fenda anti-backslash | **22** | Encoder 0 |
| **8** | Saída da haste | **23** | Canal 0 DAC |
| **9** | Motor | **24** | Entrada analógica canais 0-3 |
| **10** | Redutor | **25** | Conector S1 & S2 |
| **11** | Potênciometro | **26** | Conector S3 |
| **12** | Encoder | **27** | Conector S4 |
| **13** | Tacômetro | **28** | Conector To A/D |
| **14** | Bloco de apoio | **29** | Conector From D/A |
| **15** | Conector do potenciômetro | **30** | Conector To Load |

Tabela 1.3: Conexões típicas para o SRV-02

| **De ...** | **Para ...** | **Cabo** | **Descrição** |
|---|---|---|---|
| Potenciômetro (*Item 16*) | Conector S1 do UPM (*Item 25*) | mini DIN 6-pin para mini DIN 6-pin | Este cabo distribui ± 12V para o potenciômetro e mede a tensão de S1. |
| Tacômetro (*Item 18*) | Conector S3 do UPM (*Item 26*) | mini DIN 6-pin para mini DIN 6-pin | Este cabo resulta no sinal do tacômetro medido em S3 no UPM. |
| Encoder (*Item 17*) | Conector *Encoder 0* (*Item 22*) | Stereo DIN 5-pin para Stereo DIN 5-pin | O terminal da placa deve alimentar o encoder com + 5V e terra. O terminal irá medir os sinais A & B do canal *Encoder 0*. |
| Motor (*Item 19*) | Conector *To Load* do UPM. (*Item 30*) | DIN 4-pin para DIN 6-pin. | Este conecta a saída do amplificador para o motor. Pode-se usar uma variedade de cabos que resultam em diferentes ganhos da entrada para a saída. |
| Sinais anal. (To A/D) (*Item 28*) | Entrada analógica canais 0-3 (*Item 24*) | DIN 5-pin para 4 x RCA do DAC | Do UPM, conecta todos os sinais analógicos para a placa terminal tal que S1 é medido no canal 0. |
| Entrada UPM (From D/A) (*Item 29*) | Saída analógica canal 0 (*Item 23*) | DIN 5-pin para RCA | Esta é a saída da placa terminal que necessita ser amplificada e aciona o motor. |

Figura 1.3: Vista frontal do SRV-02.

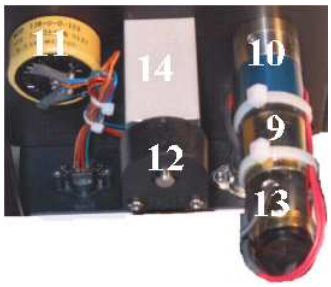


Figura 1.4: Vista inferior da lâmina superior do SRV-02.

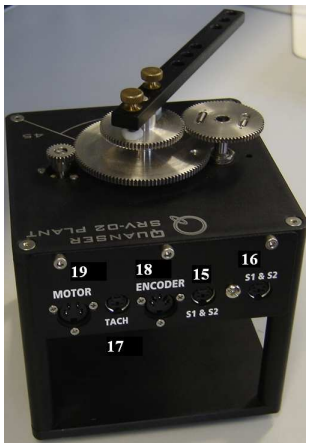


Figura 1.5: Vista das conexões do SRV-02.

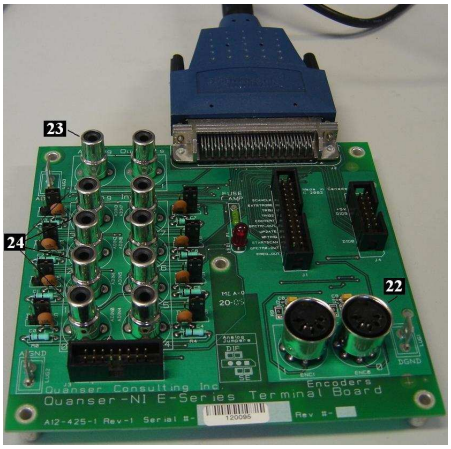


Figura 1.6: Placa terminal.

Figura 1.7: UPM.

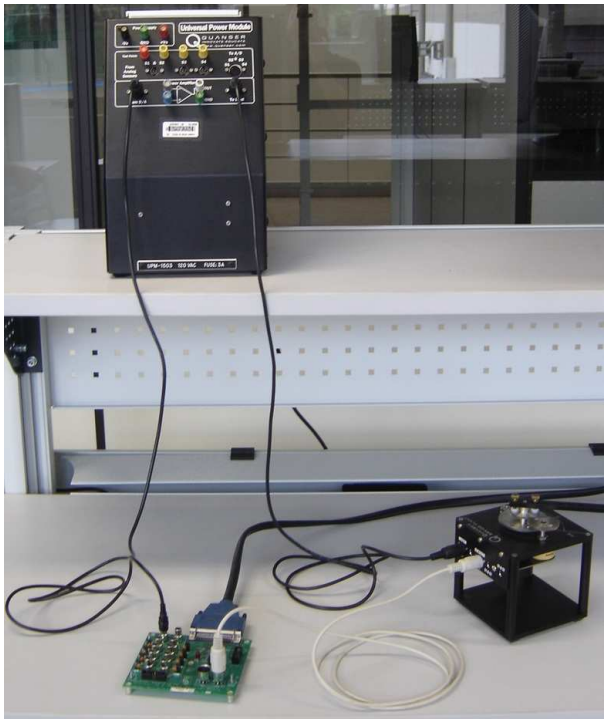


Figura 1.8: Ligações dos módulos.